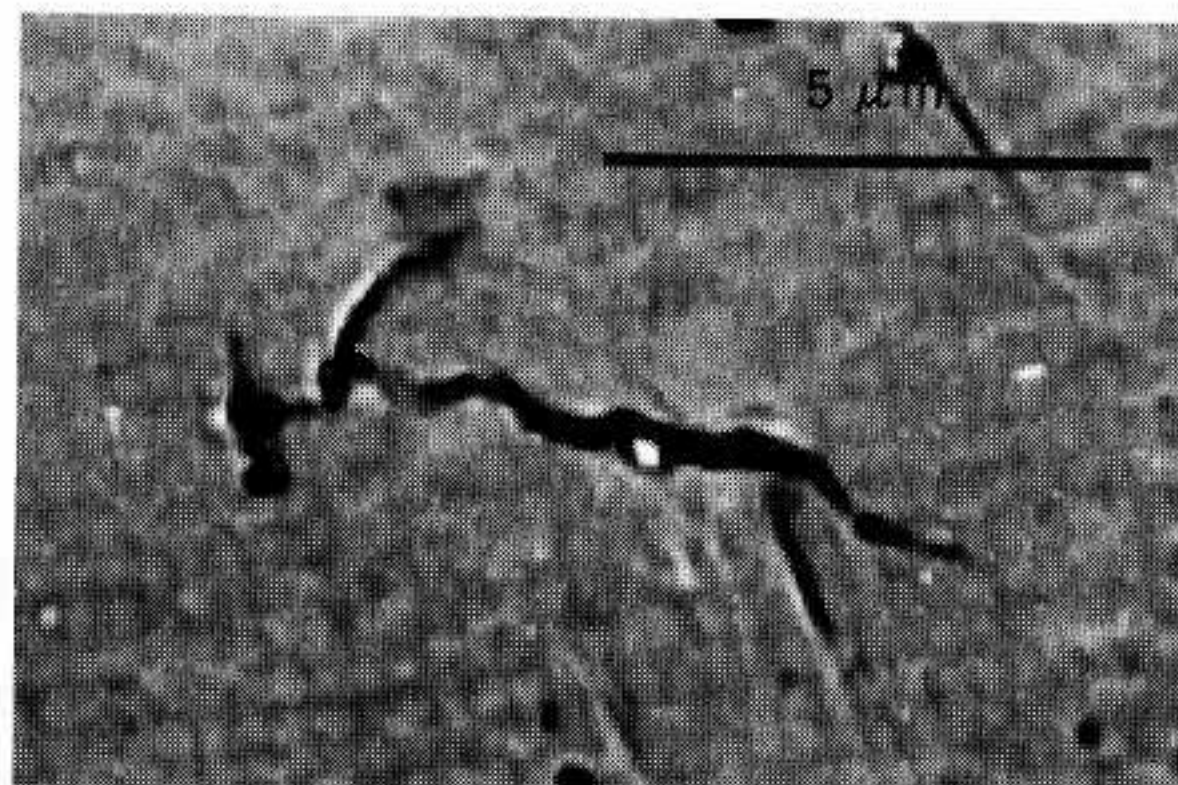


連載

金属疲労

〔5〕 金属疲労の非破壊検査

東京工業大学 水谷 義弘*



金属疲労によりステンレス鋼に発生した微細なき裂

疲労を原因とする破壊事故は何の兆候もなく突然起きるように見える。しかし、実際には破壊する以前に材料には疲労損傷が生じている。適切な非破壊検査手法でこの疲労損傷を検出し、対応をすれば破壊事故は未然に防ぐことができる。

はじめに

前回までの本連載で、金属材料は繰返し荷重を受けると疲労が発生し、さまざまな破壊事故を引き起こすことを示した。疲労を原因とする破壊事故は一見突然起きるように見えるが、実際には破壊する以前のき裂の発生過程と進展過程において、材料には変化が生じている。この材料の変化を疲労損傷といい、適切な非破壊検査手法で疲労損傷を検出し、対応をすれば破壊事故は未然に防ぐことができる。

非破壊検査手法は、疲労損傷の程度に応じて適切に選定する必要がある。すなわち、非破壊検査の知識だけではなく、疲労損傷のメカニズムに関する知識も必要となる。また、複数の非破壊検査手法の併用が有効な場合もあるので、それぞれの特徴を正しく理解し、材料と環境に応じて適切な方法を選定する必要がある。

本稿では、疲労損傷のメカニズムを概説した後に、本題の非破壊検査の紹介をする。

疲労損傷のメカニズム¹⁾

典型的な疲労破壊過程のモデルと材料に生じる疲労損傷を図1に示す。表面のすべり帯に沿って微小き裂が発生し、その後に、き裂は最大引張応力方向にほぼ垂直に進展する。

一般に、き裂の発生と進展の機構は塑性変形、すなわちすべりが最も本質的な部分を占めている。しかも、静的降伏応力よりもはるかに低い応力の

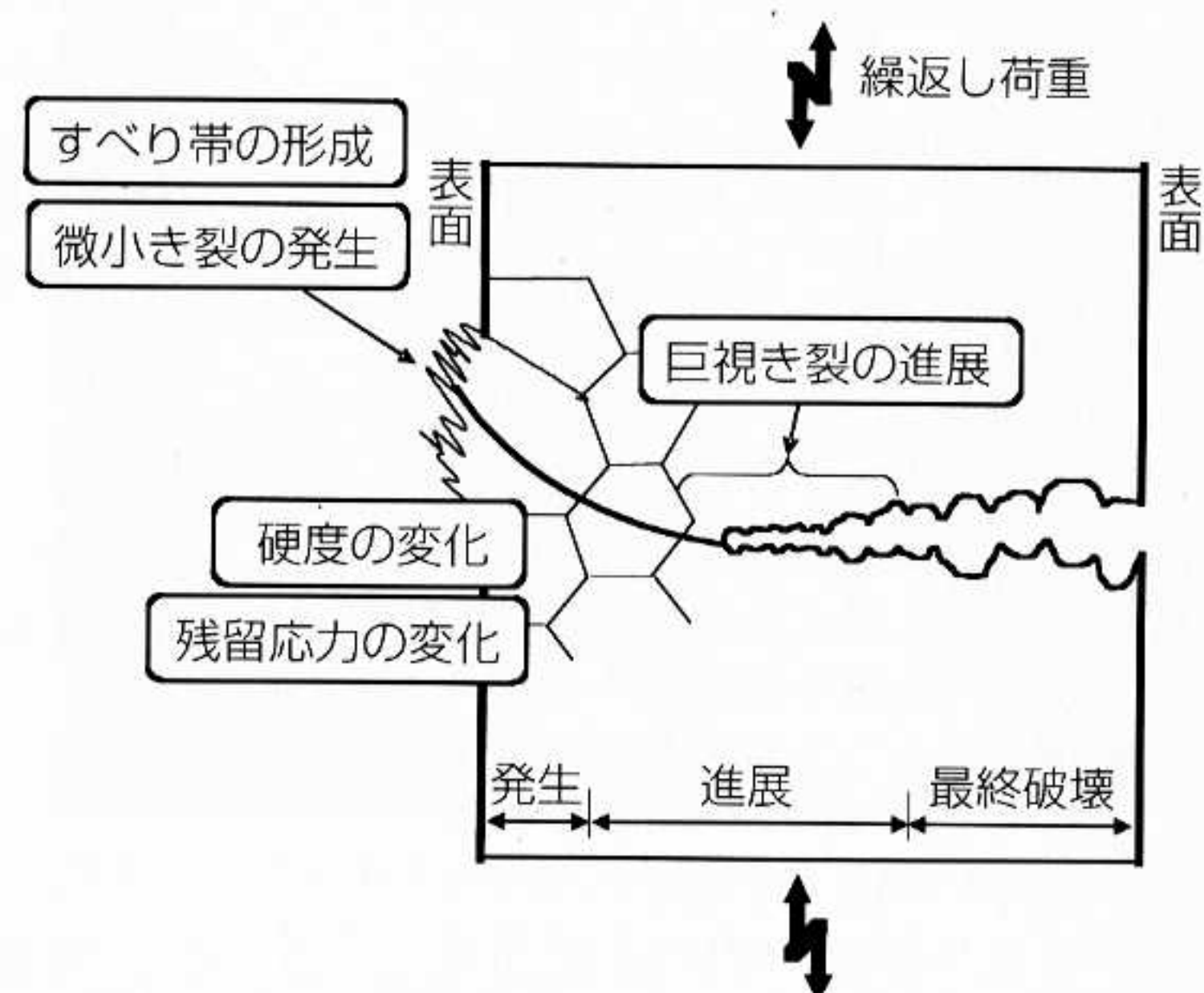


図1 典型的な疲労破壊過程と材料に生じる疲労損傷

*みづたに よしひろ：大学院理工学研究科 准教授
〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-11-70
☎03-5734-3195

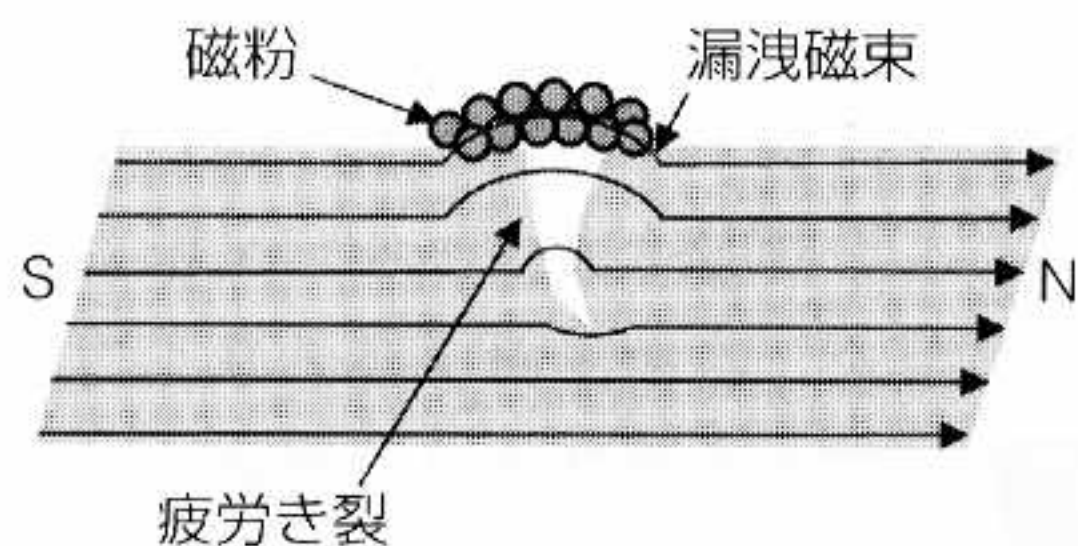


図2 磁粉探傷試験の原理

繰返しにより、局所的な塑性変形が進行する。これを繰返し変形といい、繰返し変形特性（繰返し硬化、繰返し軟化）がき裂の発生抵抗に直接関係している。き裂が進展すると徐々に残存面積が小さくなるが、残存部分（リガメント）が負荷に耐えられなくなると、一瞬にして材料は最終破壊する。

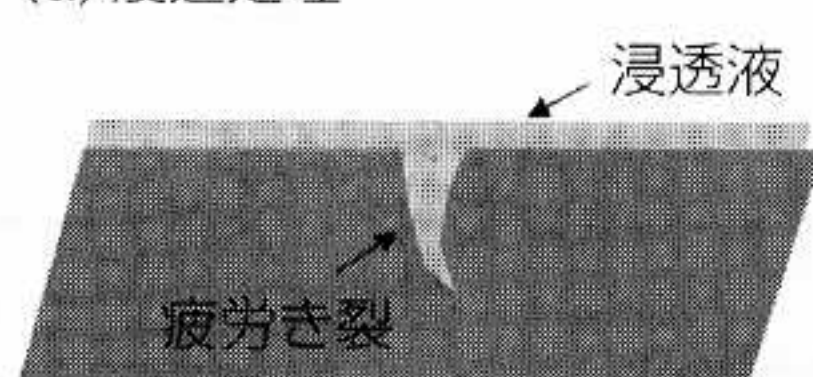
き裂発生までの疲労損傷の検出²⁾

疲労寿命の大半をき裂発生までの寿命が占めることから、き裂発生までの疲労損傷から疲労寿命を予測することが望まれている。ここでは、き裂発生までの疲労損傷の検出方法とその結果を紹介する。

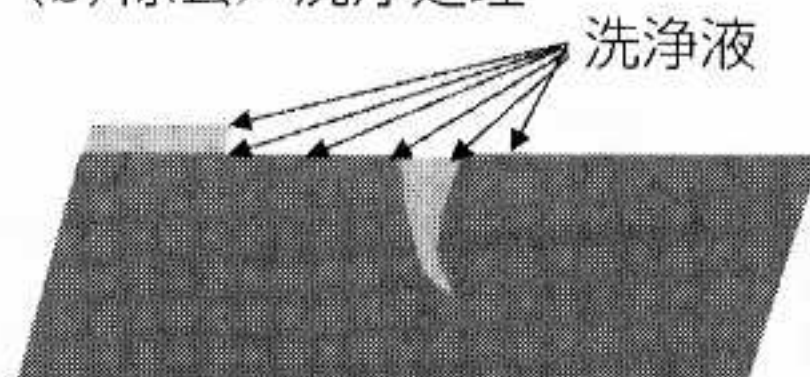
疲労損傷の非破壊的な検出方法としては、硬さ、応力-ひずみ関係のヒステリシスループ、内部摩擦（減衰能）、電気抵抗、磁気感応度、X線回折などが古くから試みられてきた。これらの方法は、実験室的には限定された条件のもとで、疲労寿命の予測に有用であることが示されている。しかし、実機と実地への適用に際しては成功していない。現在でも、疲労損傷メータとか、疲労損傷ゲージとかの開発の成功例がよく報道されるが、限定された条件のもとでしか有用性はない。

そこで、行き着く先が微小き裂の発生の検出である。微小き裂の有無の観察は目視では困難で、顕微鏡での観察を必要とする。しかし、実機の材料表面を顕微鏡で直接観察することは難しい。そのため、観察したい部分の表面形状を別の基板に転写してレプリカを作り、これを顕微鏡で観察する。この方法をレプリカ法という。レプリカ法により巨視的なき裂になる以前の1mm以下の長さの微小き裂の発生を検出することが可能となった。

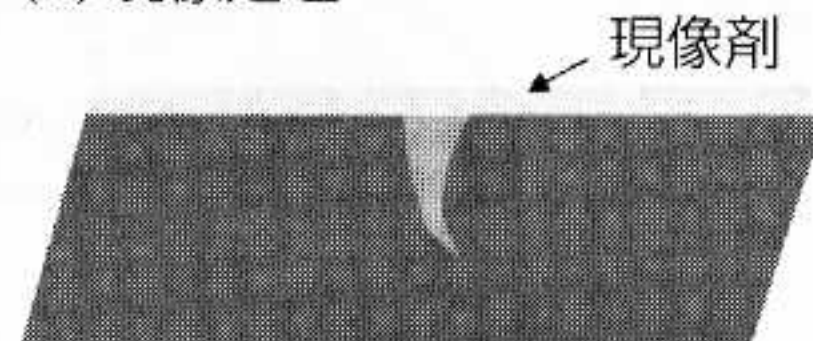
(a) 浸透処理



(b) 除去/洗浄処理



(c) 現像処理



(d) 観察

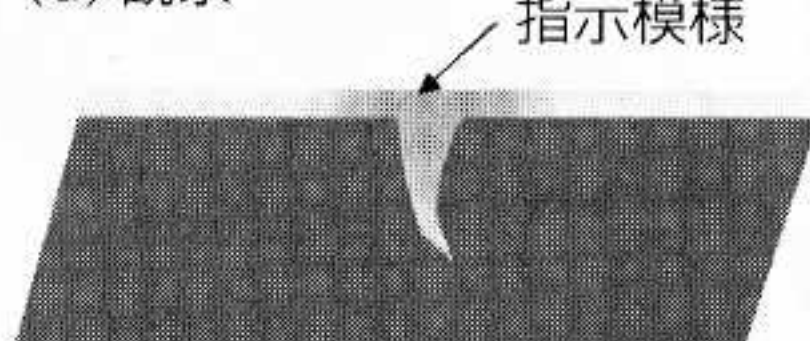


図3 浸透探傷試験の原理

き裂の検出技術³⁾⁻⁵⁾

実機と実地では、微小き裂の発生を検出することは難しく、進展している巨視き裂の検出に力が注がれている。疲労き裂の検出についてはさまざまな非破壊検査手法が提案されており、検査部位、検査コスト、要求される検査精度などに合わせて使い分けられている。以下では、代表的な非破壊検査手法を疲労き裂の検出に使用する観点から紹介する。

1. 磁粉探傷試験

(Magnetic Particle Testing : MT)

磁粉探傷試験の基本原則を図2に示す。フェライト鋼などの強磁性体を磁化した場合に表面にき裂が存在すると、この部分で磁束の通過が妨げられるため、磁束が外側に漏洩する（漏洩磁束）。この漏洩磁束を磁粉により検出することで、き裂の位置と形状を測定する。漏洩磁束により形成される磁粉模様の幅はき裂の幅の数倍から数十倍になるので、き裂の存在を目視で確認することが可能となる。オーステナイト系ステンレス鋼などの非磁性材料には適用できない。主としてプラントの圧力容器と塔槽類、鉄道車両の車軸、航空機のエンジン部品などの表面におけるき裂の検出に広く適用されている。

2. 浸透探傷試験

(Dye Penetrant Testing : T)

浸透探傷試験の基本原則を図3に示す。材料の表面にき裂が存在する場合に、着色染料または蛍

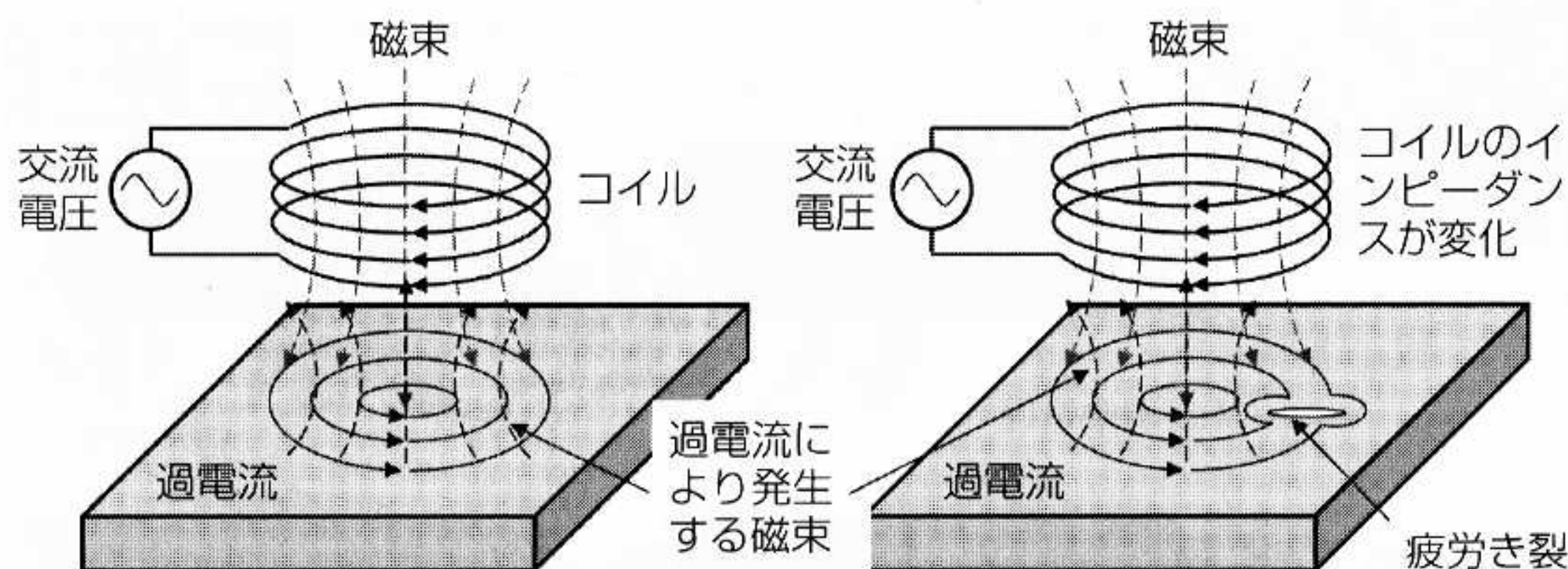


図4 渦電流探傷試験の原理

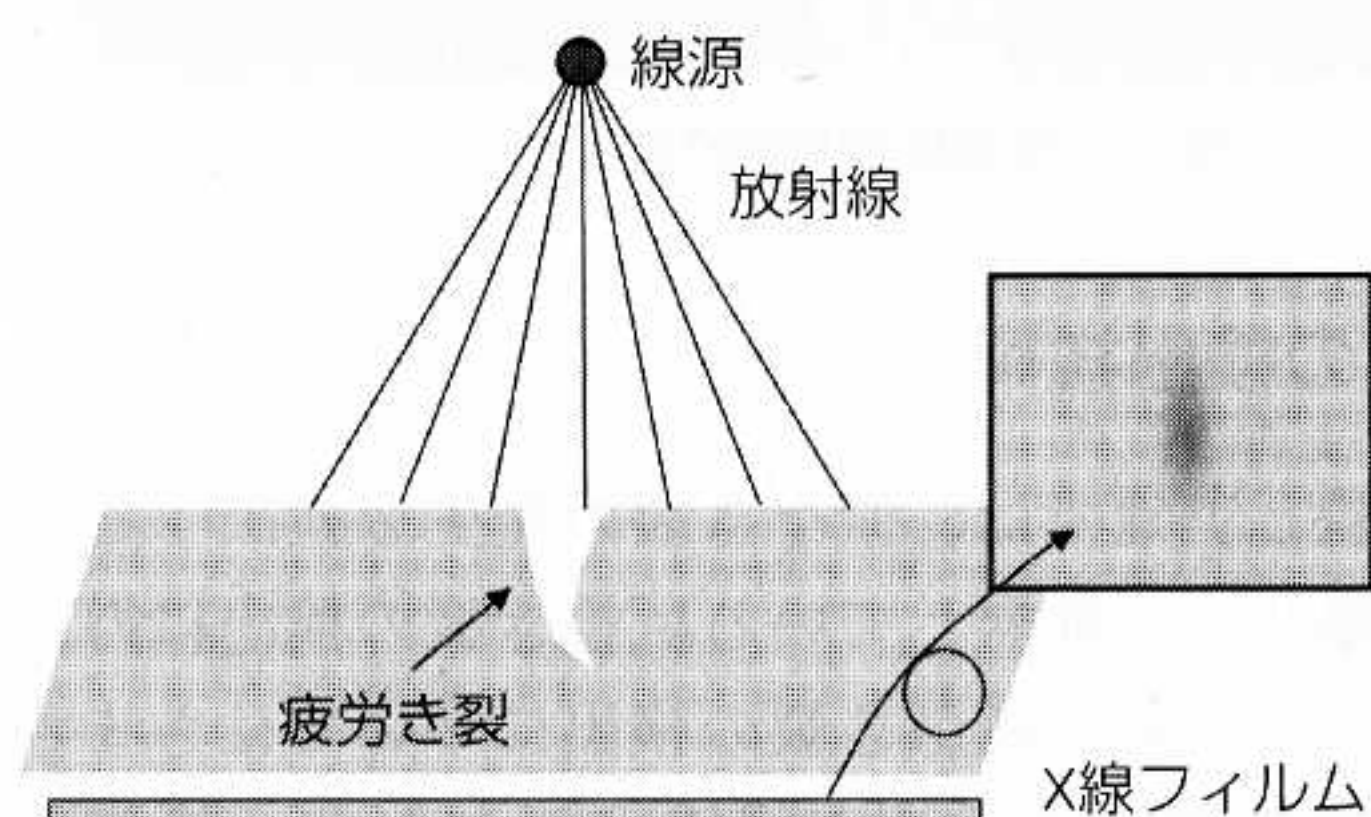


図5 放射線透過試験の原理

光塗料を含有する液体(浸透液)を塗ると、浸透液は毛細管現象によってき裂の内部に染み込む。一定時間後に表面に残った浸透液を洗浄し、現像剤を用いてき裂の中に浸透した浸透液を表面に吸い出して広げることにより、き裂を検出する。適用範囲は磁粉探傷試験とほぼ同じであるが、多孔質でなければ非磁性材料と導電性のない材料も含めてほとんどの材料に適用可能である。

3. 渦電流探傷試験

(Eddy Current Testing : ET)

渦電流探傷(渦流探傷)試験の基本原理を図4に示す。導電性のある材料の表面近くに交流を流したコイルを近づけると、材料中に渦電流が発生する。一方で、この渦電流は試験コイルが誘導する交流磁束を打ち消すような磁束を発生する性質が

ある。表面にき裂があると渦電流の流れが変わるために打ち消す方向の磁束が変化し、コイルの交流に対する抵抗(インピーダンス)が変化する。このインピーダンスの変化を捉えることによってき裂を検出する。き裂を非接触、かつ高速で検出できるため、熱交換器、復水器などの細管の探傷などに利用されている。また、航空機の胴体外板のリベット孔周りの探傷にも適用されている。

4. 放射線透過試験

(Radiographic Testing : RT)

放射線透過試験の基本原理を図5に示す。放射線は物質を透過する性質を持っているが、材料の中に空隙があると、この部分を透過する放射線の強さは周辺の健全部よりも強くなる。この放射線の強さの変化をフィルムまたはイメージングプレートで画像化することにより空隙を観察する。一般的には、放射線としてX線またはγ線を用いる。放射線透過試験は、すべての機器の工場における製造検査に広く適用されている。

ただし、使用中の検査では放射線の遮蔽の問題がある。また、疲労き裂のような平面き裂は、放射線の向きによっては開口幅が狭いために放射線の強さに差が現れにくく、検出するのが難しい。しかし、超音波探傷試験が適用できない場合に、特殊な放射線透過試験を適用することがある。

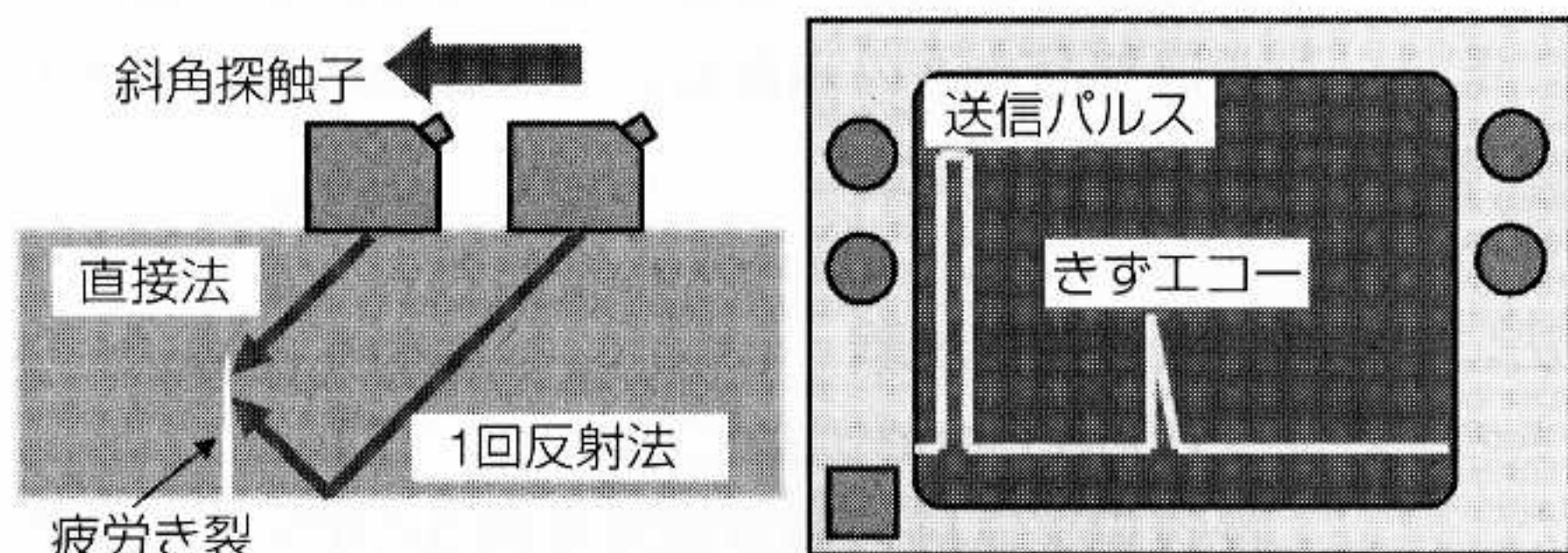


図6 超音波探傷試験(斜角探傷)の原理

5. 超音波探傷試験

(Ultrasonic Testing : UT)

超音波探傷試験の基本原理を図6に示す。超音波は指向性が強く、材料に入射すると直進するが、き裂が存在すると反

射したり回折したりする。超音波探傷試験では、反射して戻ってきたきずエコーの有無を観察することによりき裂を検出する。きずエコーが観察された時間とエコーの高さから、き裂の位置と寸法を測定できる。TOFD法などの超音波サイジング手法を用いれば、き裂の寸法をさらに高精度で測定できる。プラントの压力容器と塔槽類、配管などの使用中の検査に広く利用されている。また、航空機の機体構造およびエンジン部品の検査にも適用されている。

ここでは紹介しなかったが、その他の技術として打音検査がある。打音検査(部材をハンマーなどで叩いて音で判定する検査)は昔から鉄道車両でボルトの緩みと疲労き裂の検出を目的に行われているが、判定には熟練した技能が必要である。

各種非破壊検査手法による疲労き裂の検出性能^{5) 6)}

各種非破壊検査手法による疲労き裂の検出性能に関しては、いくつかの報告事例^{6) - 8)}がある。1970年代に米国NASAより報告された古いデータを、図7と表に示す。耐熱アルミニウム合金2219-T87に導入した密着した疲労き裂の検出性能を、各種非破壊検査手法に対して調査している。図7に示す超音波探傷試験と放射線透過試験のき裂の寸法と検出確率の関係から、放射線透過試験では疲労き裂を見逃がしやすいことが分かる。実験室における最適な条件で検出可能な最小の疲労き裂寸法を表に示す。放射線透過試験を除いてかなり小さな疲労き裂まで検出可能な結果となっているが、検出可能なき裂寸法の絶対値は試験環境、試験対象などで大きく変わるので注意が必要である。各手法の検出性能の優劣も試験環境、試験対象などで変化し、磁粉探傷試験の方が浸透探傷試験よりも検出性能が優れているとの報告もある⁸⁾。

非破壊検査を実施する際の注意

疲労き裂の検出には各種非破壊検査手法が適用

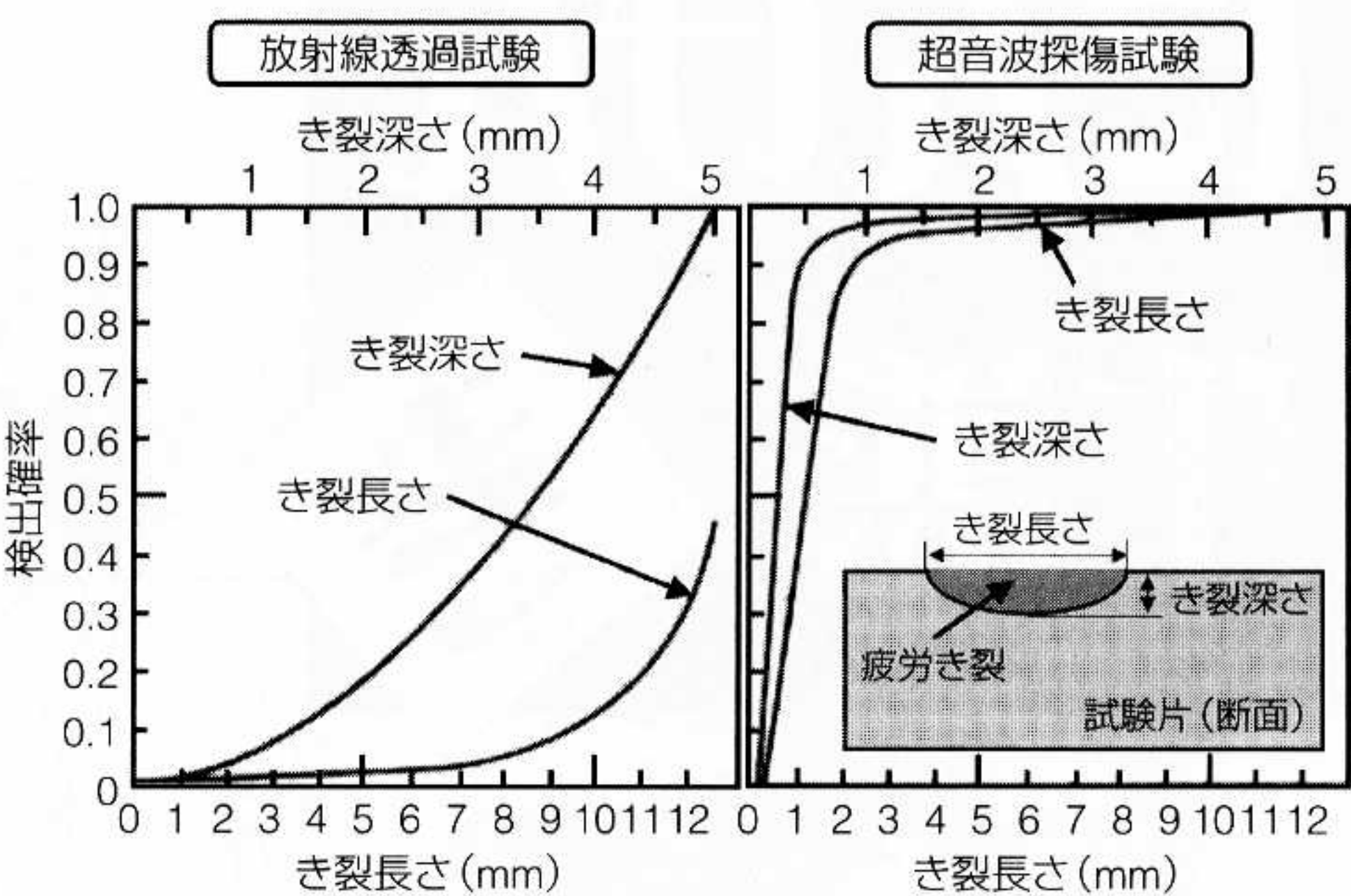


図7 疲労き裂の寸法と検出確率の関係⁵⁾

表 代表的な非破壊検査による密着した疲労き裂の検出能力⁵⁾ (実験室において最適な条件で検出される最小値)

	長さ、mm	深さ、mm
磁粉探傷試験 (MT)	0.5	0.12
浸透探傷試験 (PT)	0.2	0.07
過電流探傷試験 (ET)	0.2	0.12
超音波探傷試験 (UT)	0.17	0.17
放射線透過試験 (RT)	厚さの10%	

可能であるが、実際に適用する際には検査対象部位と同じ材質、形状の試験片を準備して、検出性能を確認した上で適用することが望ましい。また、これらの検査は素人が行うものではなく、JIS Z2305(非破壊試験－技術者の資格及び認証)で、各種非破壊検査およびレベルごとに定められた所定の訓練を受け、試験に合格した検査員が行うことが望ましい。

参考文献

1) P.J.E.Forsyth(中沢一、小林英男 訳)、金属疲労の基礎、養賢堂(1975)
2) 川田雄一、金属の疲労と設計、オーム社(1959)
3) 小林英男、破壊力学、共立出版(1993)
4) イラストで学ぶ非破壊試験入門、(社)日本非破壊検査協会(1994)
5) 上山忠夫、構造信頼性、日科技連(1984)
6) W.D.Rummel et al., The detection of fatigue cracks by nondestructive testing methods, NASA Contractor Report, CR-2369(1974)
7) 緒方隆昌、非破壊試験におけるきずの定量化について考える－検出確率と測定精度－、RUMPES、13-2、pp.10-11(1999)
8) 例えば、深沢誠、加藤昌彦、大畦久雄、三木千寿、各種非破壊試験による表面疲労亀裂の検出、溶接学会全国大会講演概要、41、pp21-24(1987)